

論文紹介: Cowee and Gary, 2012

“Electromagnetic ion cyclotron wave generation by planetary pickup ions: One-dimensional hybrid simulations at sub-Alfvenic pickup velocities”

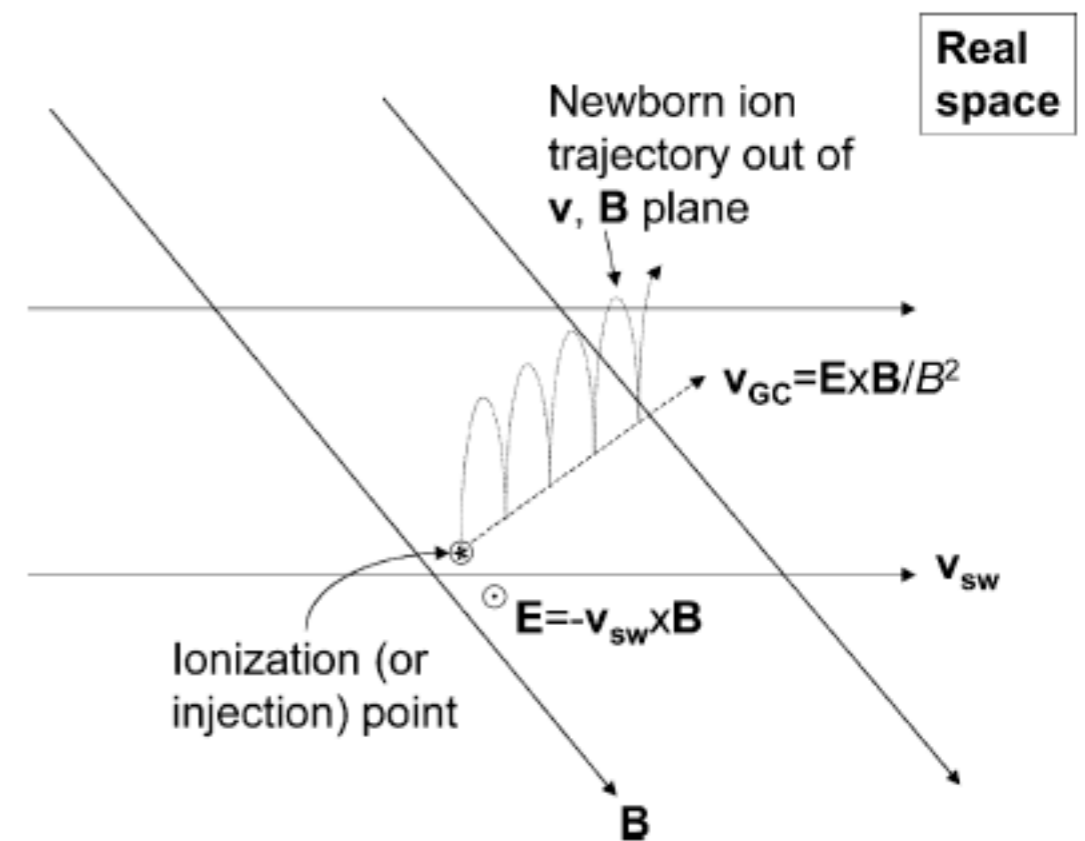
東北大学 益永圭

要旨

- これまでに様々な天体環境でピックアップイオン起源の不安定によるプラズマ波動が観測されている。
- 本研究では、ピックアップ速度をsub-Alfvenicとしたときに生まれるピックアップイオン起源のプラズマ波動のふるまいを、様々なピックアップ角度に対して1次元ハイブリッドシミュレーションを行う。
- どのような特徴を探査機が観測するか理解するため、シミュレーションでは波動成分の成長と、それにともなうピックアップイオンの分布関数の時間変化を見た。
- シミュレーション中で生まれた波動は、Linear theoryで予測される波動と同じ特徴を示し、ピックアップイオンの分布関数も確からしい傾向を示した。
- また、土星で観測されたドップラーシフトの効果を再現した。
- しかしながら、今回の研究はかなりシンプルなモデルであり、考慮すべき点も多い。

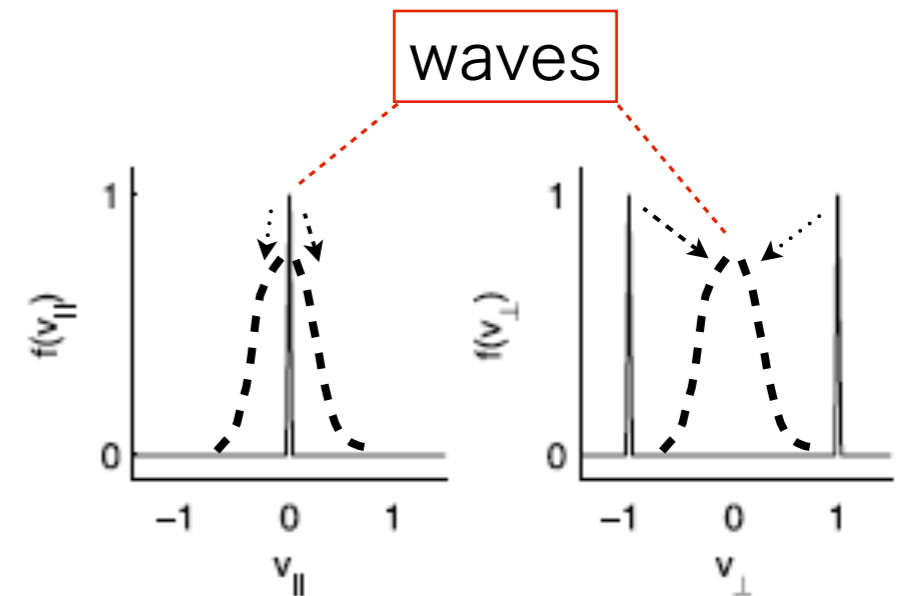
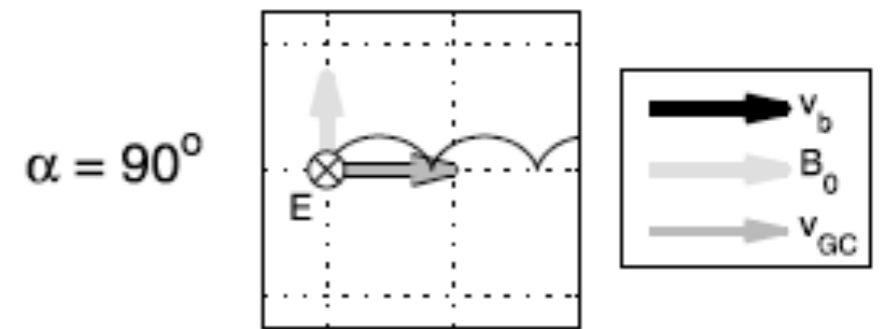
Introduction

- Ion pickup: 中性粒子がイオン化された瞬間、電場を感じて加速を受ける。イオンは磁場の周りを旋回するため、理想的な軌道は $E \times B$ ドリフトと同じサイクロイド。



Introduction

- イオンピックアップが起こる際、イオンサイクロトロン・リング不安定 (分布関数上の異方性) が生まれる。
- この不安定を解消するために波動が生まれ、イオンを散乱させることで安定な分布関数に戻っていく。



Introduction

- Linear theoryでは、リング分布によって生まれる不安定はion cyclotron ring instability (lower β)か mirror mode instability (higher β)であると示されている。
- 本研究では、より一般的な前者について考える。
- ion cyclotron ring instabilityで生まれる波動の特徴
 1. 波動は主に磁力線に沿って伝播する。
 2. 左回りの円偏波
 3. 周波数は f_{ci} 付近

Objective

- ピックアップ不安定によって生まれた波動が、ピックアップアングル α によってどのように成長、一次元ハイブリッドハイブリッドシミュレーションで調べる。
- 背景プラズマ、ピックアップイオンはともにプロトン。パラメータは以下に記す。

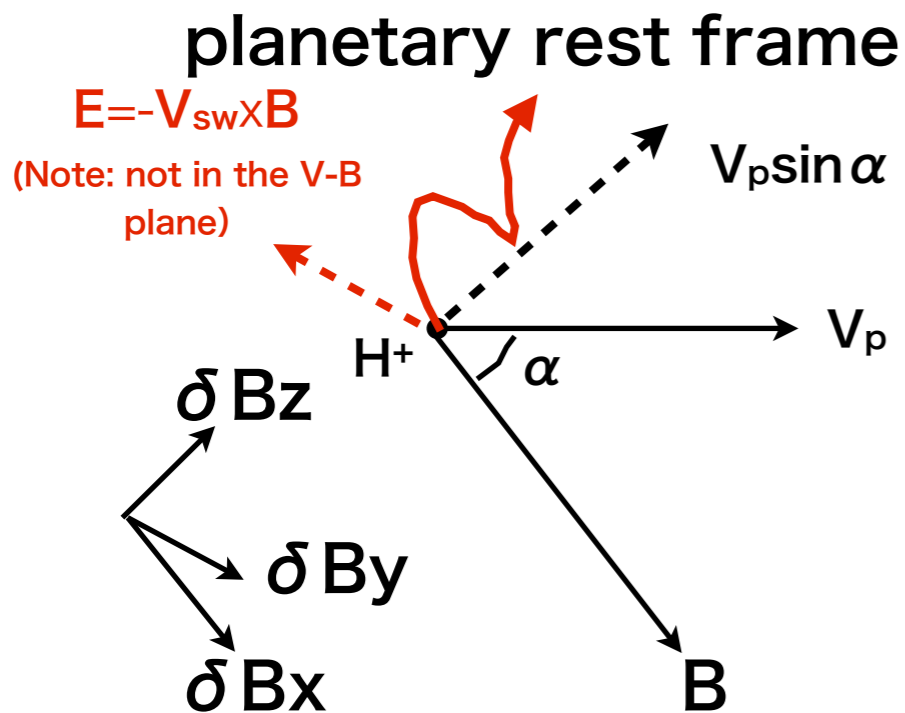
Table 1. Simulation Input Parameters^a

j	$n_j (n_b)$	$\beta_{\parallel j}$	$v_p (v_A)$	$\Lambda_j (n_b \Omega_i)$
H ⁺ background	1	0.1	-	-
H ⁺ pickup	injected	~ 0	0.5	$\sim 10^{-3}$

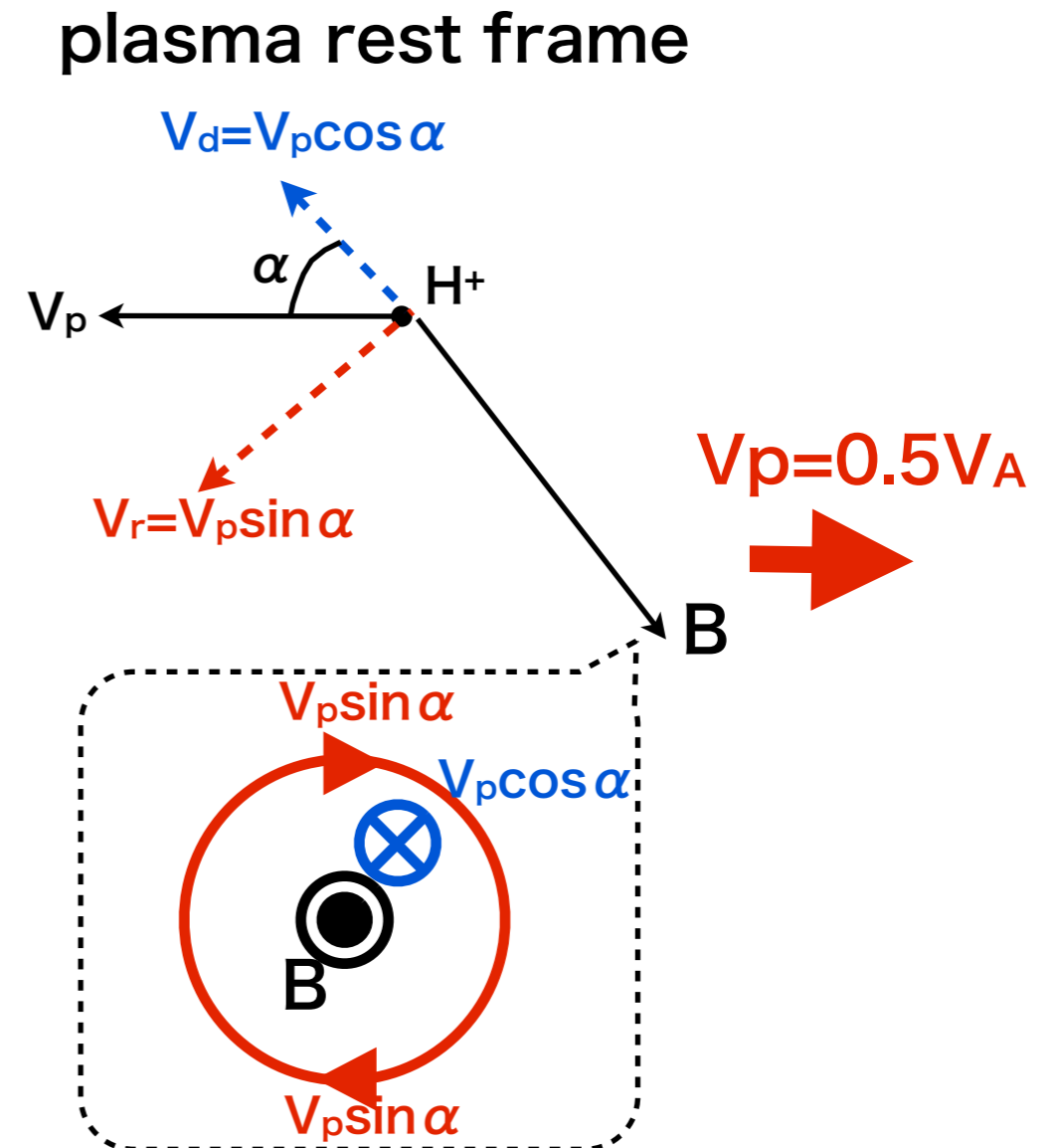
^a $c/v_A = 1000$.

Introduction

本研究では、planetary rest frame (SC frame)にて波動成分の成長を、plasma rest frameにてピックアップイオンの分布関数の推移を、ハイブリッドコードを用いて計算している。

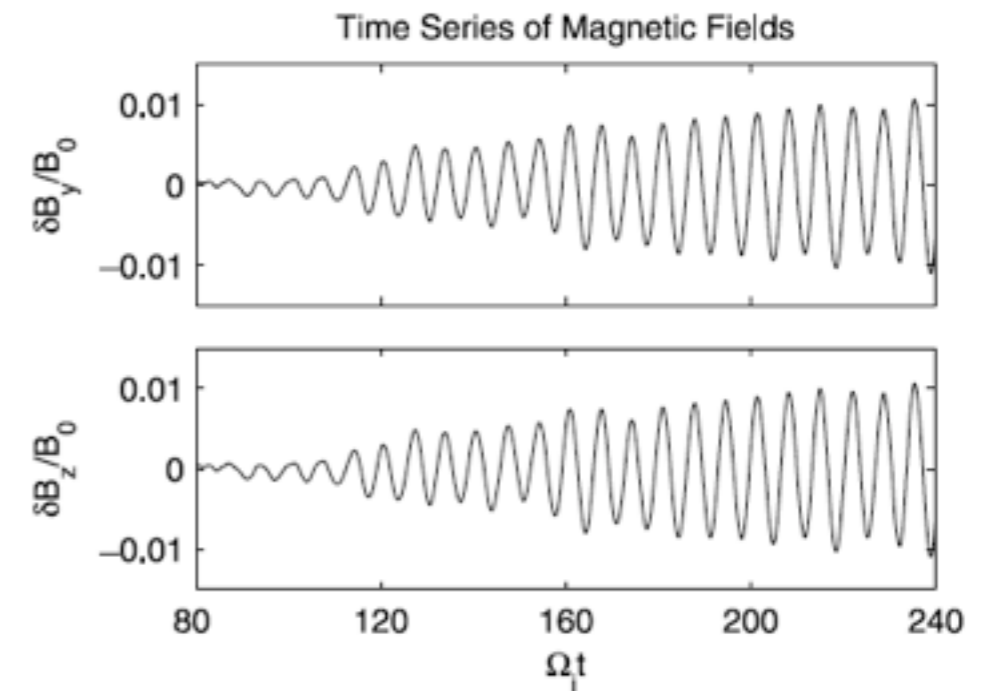
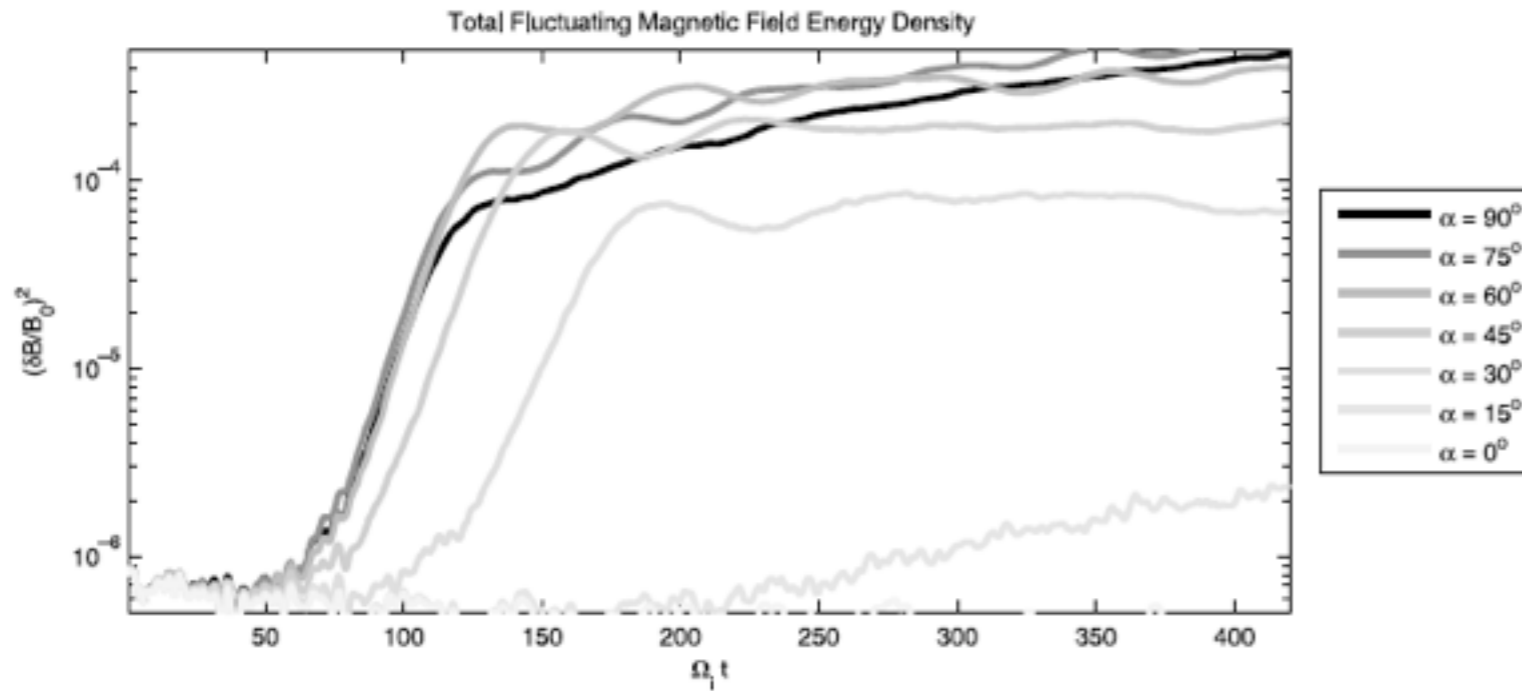


H^+ ion is accelerated by the convection electric field and starts $E \times B$ motion with a cycloid orbit.



H^+ ion is injected to background plasma with a velocity $0.5 V_A$. The H^+ ion starts gyro motion.

Results

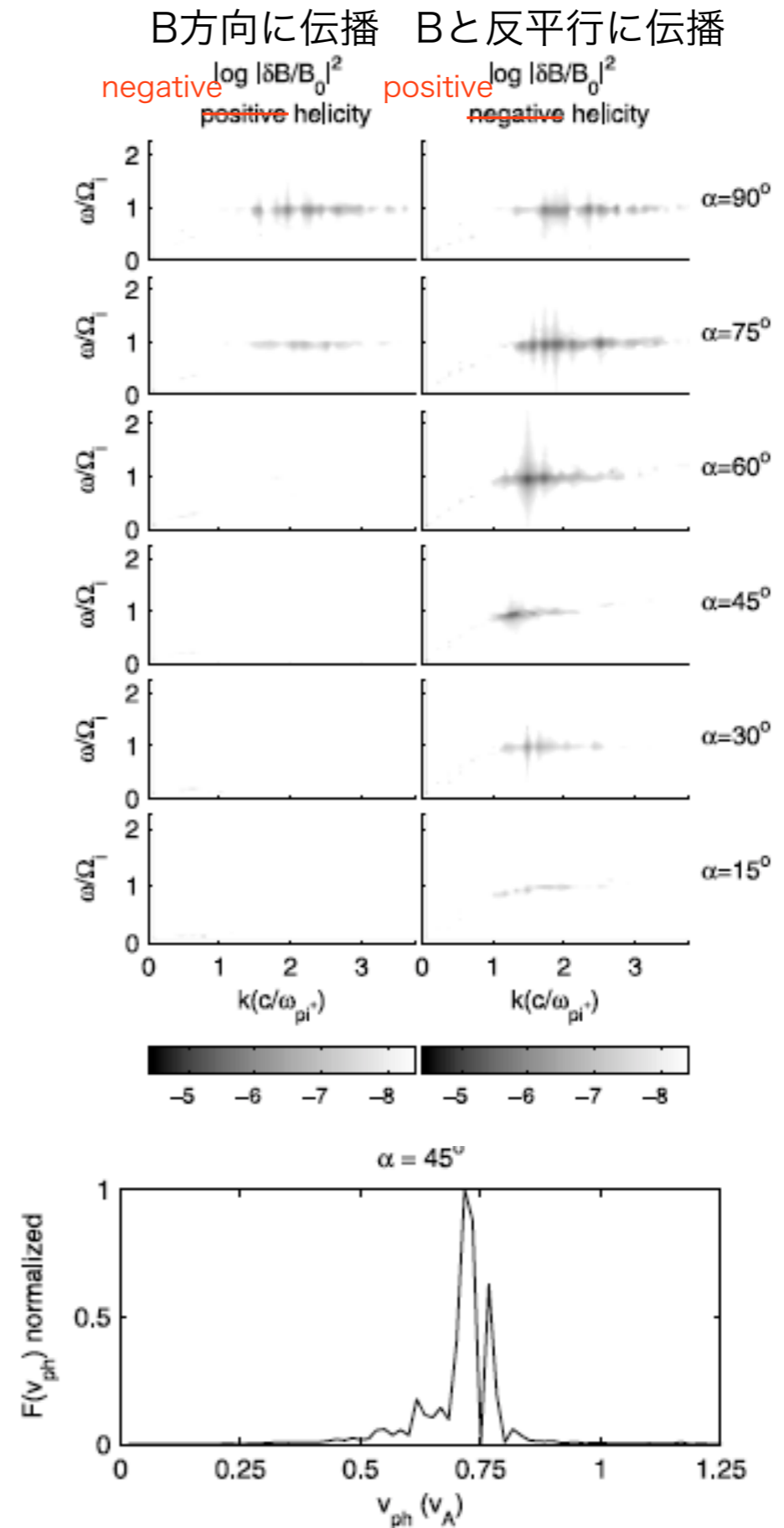


- $\alpha > 15^\circ$ で波動は成長する。ただし、一次元シミュレーション+限られた伝播方向なので、実際より強度は強く出てしまっている。

- 時間とともに波動が成長する様子。

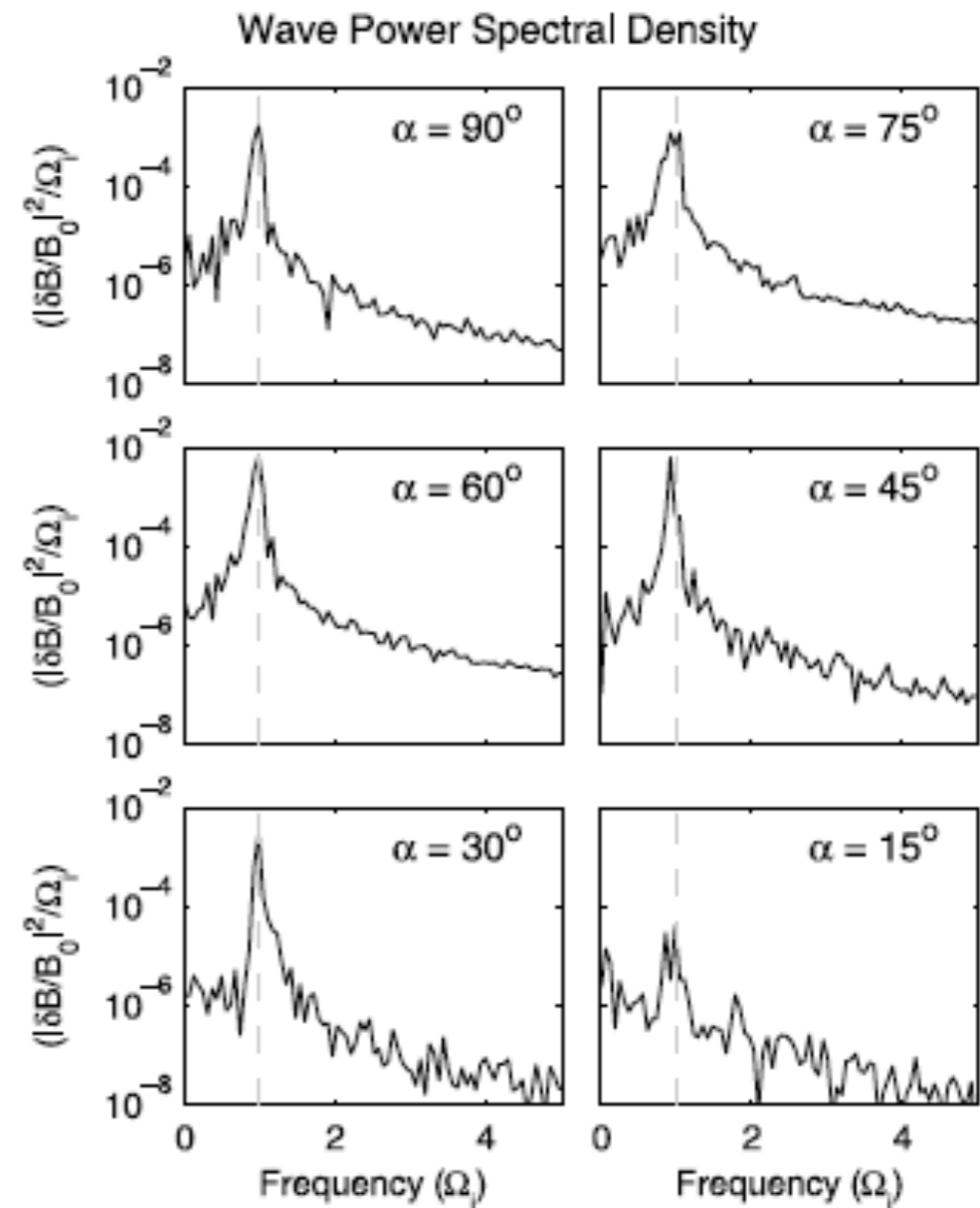
Results and discussions

- 伝播する左向き偏波。
 $\alpha=90^\circ$ でB両方向対称に伝播。 α が小さくなるほど、反平行に伝播する波動が支配的になる。(特徴1、2)
- また、 α が小さくなるほど、分布関数の異方向性が小さいため、波のパワーは弱くなる。
- 位相速度 $V_{ph}=\omega/k$ が求まる。 $\rightarrow V_{ph}<V_A$



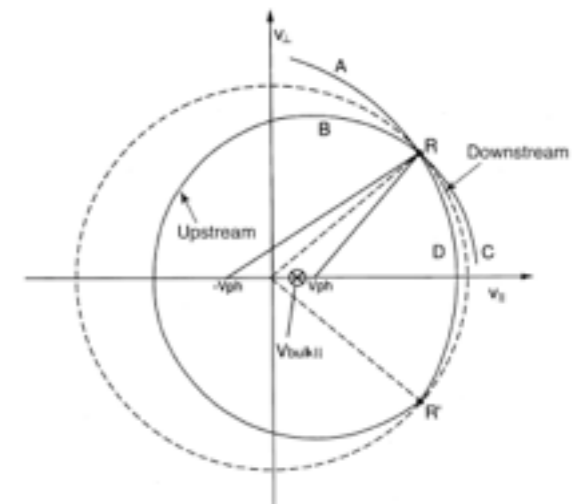
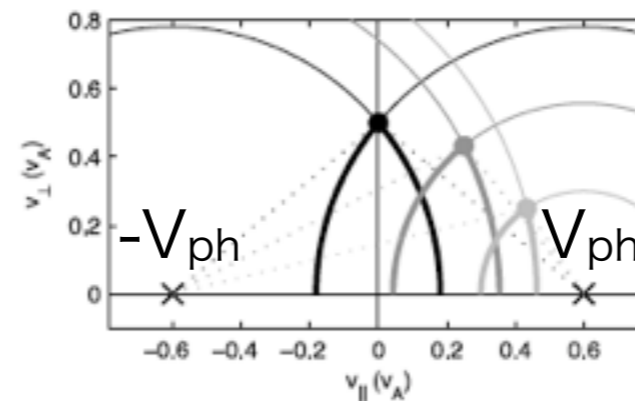
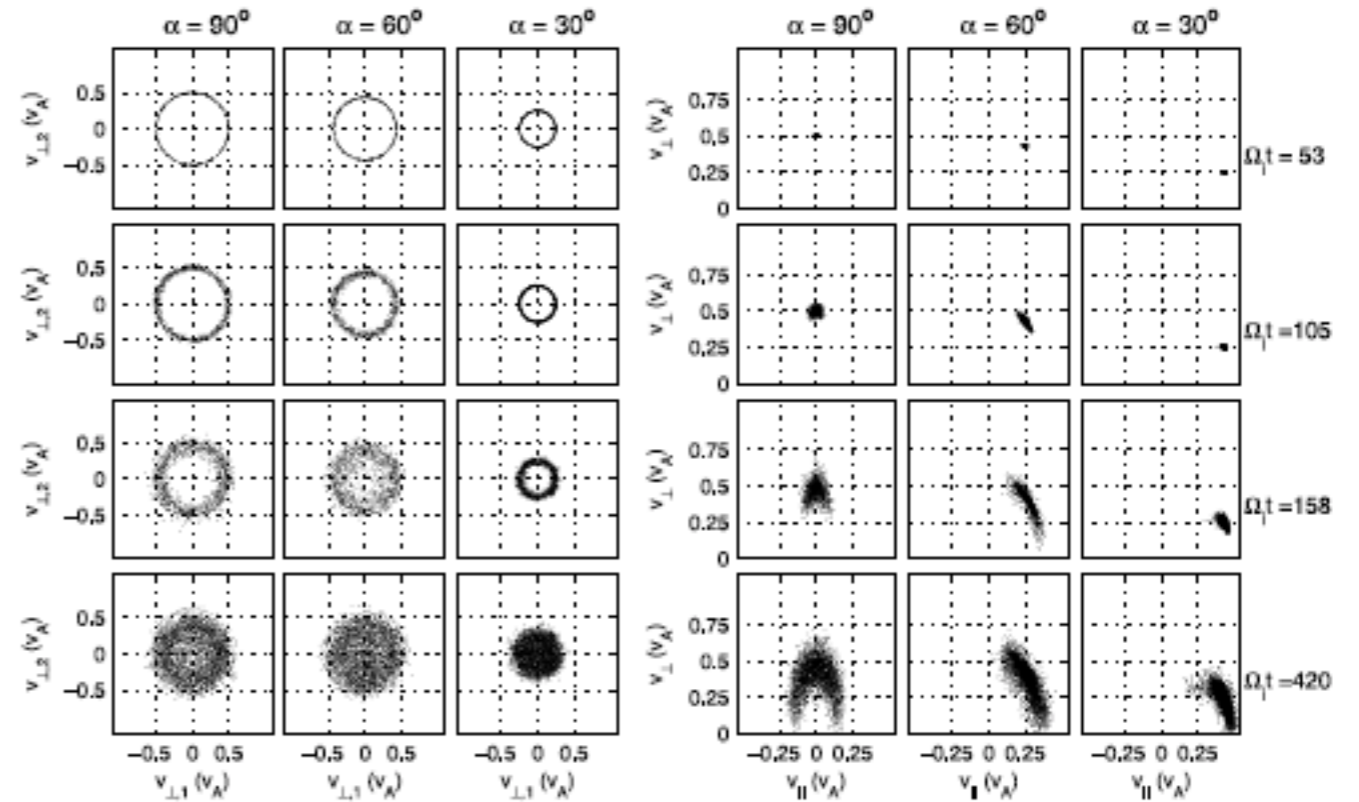
Results and discussions

- パワースペクトル for varying α
- α の値によらず、pickup ionのサイクロトロン周波数で強度が最大となる。(特徴 3)
- シミュレーションで発生した波動はLinear theory と一致。



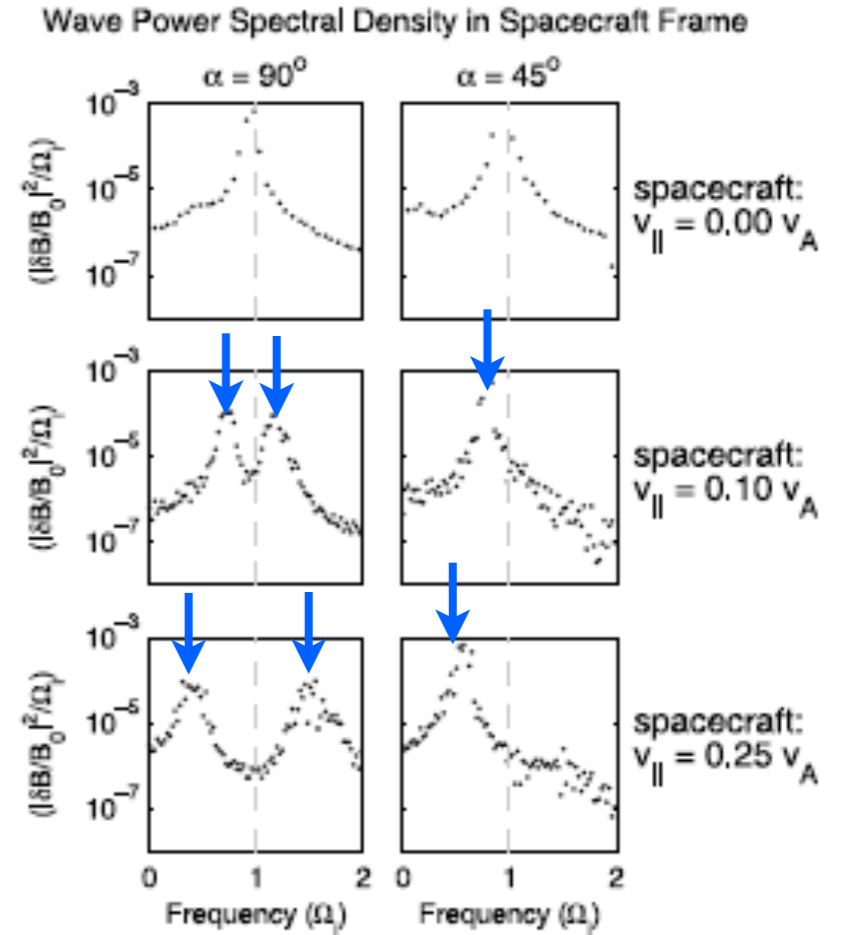
Results and discussions

- V_{\perp} - V_{\perp} 面：リング分布→エネルギー散乱
- V_{\perp} - V_{\parallel} 面：injection point→ピッチ角散乱→エネルギー散乱
- 分布関数は bispherical (リング分布から移行した分布) になる。



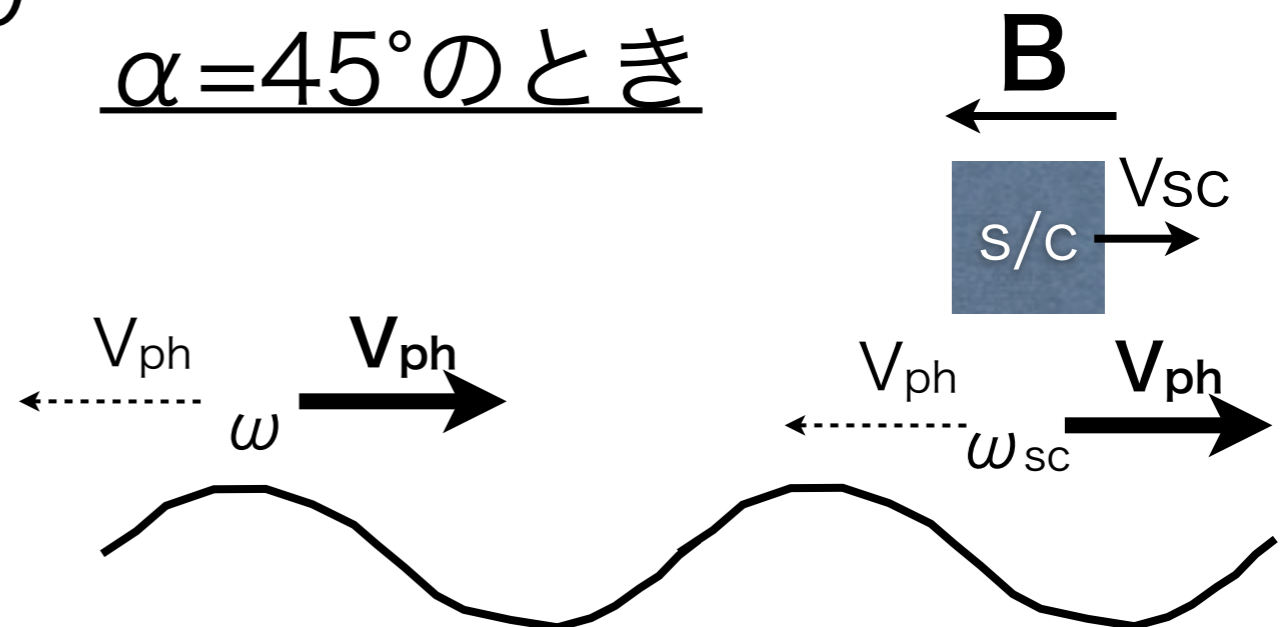
Results and discussions

- 衛星速度の磁場平行成分が波動の伝播速度(**B**方向)に比べて無視できないとき、衛星はドップラーシフトした波動を観測する。



- $\omega_{sc} = (V_{ph} - V_{sc}) / V_{ph} \cdot \omega$
($\because \mathbf{V}_{sc} \parallel \mathbf{k}$)

$\alpha = 45^\circ$ のとき



まとめ

- ピックアップイオンのリング不安定によって波動が生成される。衛星系で観測されるのは、左周りの円偏波。この波がピックアップイオンを散乱して安定な状態へ戻っていく。
- シミュレーションにおいてうまれた波動は、サイクロトロン周波数付近にピークを持つ、左向き偏波であった。磁力線方向へ伝搬した。これらの特徴は、linear theoryで示された特徴と一致する。
- ピックアップイオンの速度分布関数はリング分布から、ピッチ角・エネルギー散乱を経てbisphericalな分布へと変化していくことも確認された。
- 衛星が波の伝播方向へ十分大きな速度を持っているときは、ドップラーシフトした波動が観測された。

太陽系天体におけるイオンピック アップ波動観測のレビュー

Jupiter's Moon

- イオ
 - イオではwakeを除く下流側で SO_2^+ と SO^+ のサイクロトロン波が観測されている。
 - イオトーラスでは、 SO_2^+ と SO^+ は乖離するため、マイナーになる。それらが乖離してできた S^+ 、 O^+ がメインになるが、これらのサイクロトロン波はあまり観測されていない。濃密な熱的 O^+ と S^+ がバックグラウンドプラズマになると、ピックアップで生じる波を減衰させるため。こういった減衰の効果は本研究のシミュレーションでは再現できていない。
- エウロパ
 - エウロパのwakeにおいても、イオンサイクロトロン波が観測されている。(fc: O_2^+ , Cl^+ , Na^+ , and Ca^+)
 - エウロパの上流ではまだピックアップイオンの観測は認められていない。

Saturn's Moon

- エンセラダス
 - パイオニアやボイジャーによって内部磁気圏内では O^+ のサイクロトロン波が観測され、カッシーニによって水グループのサイクロトロン波が観測。これらのソースがエンセラダスであることを突き止めた。
 - カッシーニがHigh inclinationの軌道だったとき、サイクロトロン波の周波数がローカルのサイクロトロン周波数と一致しないことを示した。探査機が背景磁場に対して速度成分を大きく持つため、ドップラーシフトした波動を観測したと考えられる。本研究では、このドップラーシフトの効果は再現することができた。
- タイタン
 - タイタンでは未だにイオンサイクロトロン波は観測されていない。
 - タイタンは土星磁気圏の外側に位置(MPのすぐ内側)する衛星なので、時に太陽風にさらされる。そのため、ピックアップ速度は変化しやすく、sub-Alfvenic or super-Alfvenicである。

まとめ

- 様々な太陽系天体において、これまでにピックアップイオン不安定から生じるイオンサイクロトロン波が観測されている。

- イオ
 - エウロパ
 - エンセラダス
 - タイタン
 - 金星
 - 火星
 - 彗星
- sub-Alfvenic
- super-Alfvenic

- Future workとしては、現在のシミュレーションを、金星、火星、彗星といった上流でピックアップが頻繁に起こるものに拡張する。その際、ピックアップ速度はsuper-Alfvenicになる。